

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г.В. Демьянов, В.А. Орлов, А.В. Титов, К.Н. Шорин, А.С. Яров

Все основные поляризационные характеристики синхротронного излучения, включая параметры Стокса, степени линейной и циркулярной поляризации, эллиптичность, рассчитаны с учетом деполяризующего влияния бетатронных колебаний. Расчеты подтверждаются данными эксперимента на синхротроне ФИАН с максимальной энергией 600 МэВ.

Результаты классической теории синхротронного излучения (СИ) /1/ в приближении круговой орбиты в целом хорошо согласуются с экспериментом /2, 3/. Тем не менее имеются и систематические отклонения, впервые отмеченные в /2/ и объясняемые воздействием бетатронных колебаний /2, 4/. Однако до последнего времени данные о поляризации были неполны ввиду непоследовательности экспериментальных методик. Лишь в /5/ апробирована адекватная методика и впервые измерена степень поляризации СИ. В данной работе приводятся результаты последовательного изучения проблемы на основе расчета и измерения параметров Стокса частично поляризованного СИ.

Уравнения движения электрона в слабофокусирующем магнитном поле можно записать в виде

$$\begin{aligned} r &= R_0(1 + a \sin \theta_1), \quad z = R_0 b \sin \theta_2, \\ \theta &= \theta_0 + a \cos \theta_1 / \sqrt{1-n} - a^2 (\sin 2\theta_1) (3-n) / \gamma \sqrt{1-n} - b^2 \sqrt{n} (\sin 2\theta_2) / 8, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_0 — радиус равновесной орбиты; $a = A_r/R_0$; $b = A_z/R_0$ — приведенные амплитуды радиальных и аксиальных колебаний с частотами соответственно $\omega_r = \sqrt{1-n} \omega_0$, $\omega_z = \sqrt{n} \omega_0$ и начальными фазами φ_1 и φ_2 ; n — показатель поля; $\theta_{1,2} = \omega_{r,z} t + \varphi_{1,2}$; $\theta_0 = \omega'_0 t$; $\omega'_0 = \omega_0 [1 + (3-n)a^2/4 + nb^2/4]$ — "средняя" угловая скорость электрона ($\omega'_0 = \langle \dot{\theta} \rangle$). "Круговая частота" $\omega_0 = eH_0 c/E$, где $H_0 = H(R_0)$, E — полная энергия электрона, причем, $\omega_0 \neq v_0/R_0$. Полная скорость v_0 определяется из (1) как

$$v_0 = (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 + \dot{z}^2)^{1/2} \approx \omega_0 R_0 (1 + a^2(1-n)/2 + b^2 n/2).$$

Компоненты электрического поля в волновой зоне могут быть вычислены на основе исходного соотношения

$$\mathcal{E}_\sigma = (ei/c^2 r_0)(\omega/\omega_0) \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} v_x(\chi) \\ -v_y(\chi) \sin \psi + v_z(\chi) \cos \psi \end{array} \right\} e^{i(\omega/\omega_0)(x - \omega_0 r(\chi) n/c)} d\chi, \quad (2)$$

где $\chi = \omega_0 t$; $n = (0, \sin \psi, \cos \psi)$; ψ — угол, образуемый вектором n с осью y , соответствующие мощности излучения

$$dW_\sigma/d\Omega = (cr_0^2/4\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\pi}^{\pi} |\mathcal{E}_\sigma|^2 dt. \quad (3)$$

Нетривиальный расчет приводит к следующим выражениям:

$$dW_\sigma/d\Omega = (ce^2/12\pi^4 R^2) \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu^2 \int_0^{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} u^2 K_{2/3}^2 [(\nu/3) u^{3/2}] \\ u \tilde{\psi}^2 K_{1/3}^2 [(\nu/3) u^{3/2}] \end{array} \right\} d\delta, \quad (4)$$

где $u = (1/\gamma^2 + \tilde{\psi}^2)$; $\gamma = E/m_0c^2$ — релятивистский фактор; $\tilde{\psi} = \psi + b\sqrt{n} \cos\delta$; K_μ — модифицированные функции Бесселя. Параметры Стокса для фиксированной частоты находим по формулам:

$$S_0 = dW_\sigma/d\Omega + dW_\pi/d\Omega, \quad S_1 = dW_\sigma/d\Omega - dW_\pi/d\Omega, \quad (5)$$

$$S_2 = (cr_0^2/4\pi) \langle \mathcal{E}_\sigma \mathcal{E}_\pi^* \cos\kappa \rangle; \quad S_3 = (cr_0^2/4\pi) \langle \mathcal{E}_\sigma \mathcal{E}_\pi^* \sin\kappa \rangle,$$

где $\kappa = \pi/2$ — сдвиг фаз между компонентами поля; $\langle \dots \rangle$ означают усреднение по времени и начальным фазам; в дальнейшем будем пользоваться нормированными параметрами Стокса $\xi_i = S_i/S_0$, $i = 1, 2, 3$. Используя (2) — (5), получаем окончательные формулы:

$$\xi_1 = \int_0^{2\pi} (u^2 K_{2/3}^2 - u \tilde{\psi}^2 K_{1/3}^2) d\delta / \int_0^{2\pi} (u^2 K_{2/3}^2 + u \tilde{\psi}^2 K_{1/3}^2) d\delta, \quad (6)$$

$$\xi_2 = 0, \quad \xi_3 = \int_0^{2\pi} u^{3/2} K_{2/3} K_{1/3} \tilde{\psi} d\delta / \int_0^{2\pi} (u^2 K_{2/3}^2 + u \tilde{\psi}^2 K_{1/3}^2) d\delta.$$

Здесь для сокращения записи опущен аргумент функций $K_\mu(\eta)$ (см. (4)). Степени линейной и круговой поляризации равны соответственно $P_l = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}$, $P_c = |\xi_3|$; значение $\xi_2 = 0$ обусловлено сдвигом фазы $\kappa = \pi/2$. Общая степень поляризации $P = \sqrt{P_l^2 + P_c^2} = \left(\sum_{i=1}^3 \xi_i^2 \right)^{1/2}$. Значения ξ_1 , ξ_2 , представленные в (6), имеют место лишь в случае использованной выше системы координат; для дальнейшего изложения весьма важным будет утверждение, что, в то время как P_c и ξ_3 являются инвариантами относительно вращения вокруг вектора v_0 , параметры ξ_1 и ξ_2 не постоянны, а третьим инвариантом будет степень линейной поляризации P_l ; в плане экспериментальной методики этот аспект является определяющим.

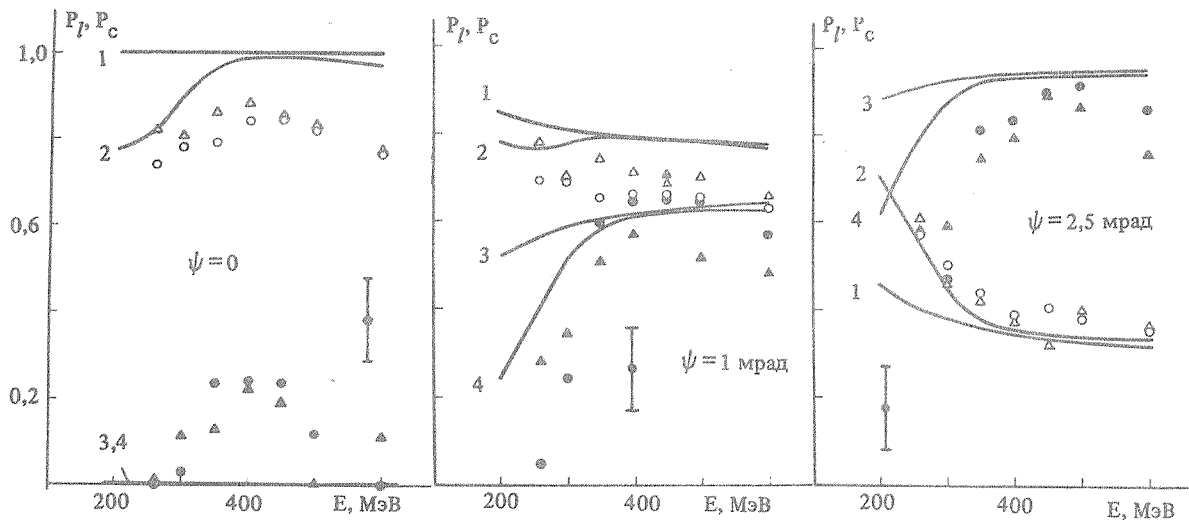


Рис. 1. Динамика степени линейной (P_l) и циркулярной (P_c) поляризации СИ для трех значений угла ψ в синхротроне ФИАН на 600 МэВ в зависимости от энергии E : 1 — P_l , однородное магнитное поле (ОП), $\alpha_z = 0$; 2 — P_l , неоднородное поле (НП); 3 — P_c (ОП); 4 — P_c (НП); \circ — P_l ($\alpha \approx 0^\circ$); \triangle — P_l ($\alpha \approx 22,5^\circ$); \bullet — P_c ($\alpha \approx 0^\circ$); \blacktriangle — P_c ($\alpha \approx 22,5^\circ$); кривые — расчет по формуле (6).

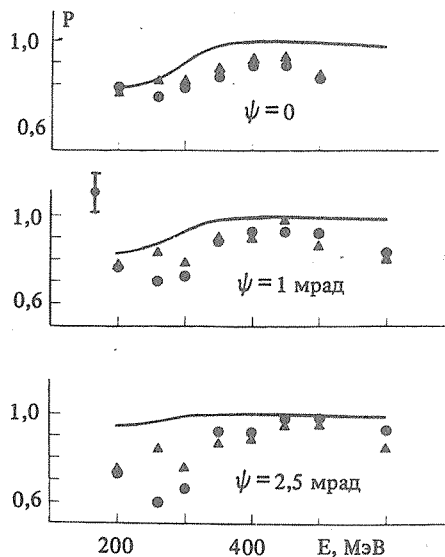


Рис. 2. Динамика полной степени поляризации P : \bullet — $a \approx 0^\circ$, \blacktriangle — $a \approx 22,5^\circ$.

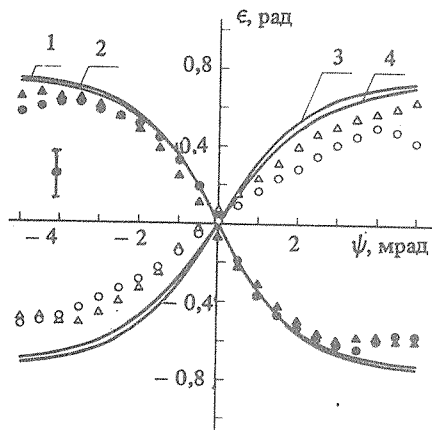


Рис. 3. Зависимость угла эллиптичности СИ от направления излучения: 1 — $E = 600$ МэВ (ОП), 2 — $E = 600$ МэВ (НП), \bullet — $a \approx 0^\circ$, \blacktriangle — $a \approx 22,5^\circ$; 3 — $E = 300$ МэВ (ОП), 4 — $E = 300$ МэВ (НП), \circ — $a \approx 0^\circ$, \triangle — $a \approx 22,5^\circ$. Для случая $E = 300$ МэВ для удобства указаны значения $-\epsilon$.

Апробирование формул (6) проведено в эксперименте на синхротроне ФИАН, работающем в стандартном режиме. Параметры Стокса и степень поляризации измерены в диапазоне $200 \div 600$ МэВ; при этом существенно менялась амплитуда бетатронных колебаний $\sigma_z = (A_z^2)^{1/2} = 4,9 \div 0,6$ мм. Эти значения определялись по измерениям дисперсии нормального распределения частиц в сечении пучка фотометрическим способом.

Параметры Стокса измерялись для излучения с длиной волны $\lambda = 476$ нм методом скоростного фотографирования; были обеспечены достаточная монохроматичность ($\Delta\lambda \sim 6$ нм), моноэнергетичность электронов ($\Delta E < 0,2$ МэВ) во всем диапазоне E и точность выставления углов взаимного расположения осей поляризаторов и фазовращающей пластинки ($\Delta a \lesssim 1^\circ$). Измерения проведены при разных ориентациях этих осей: при примерном совпадении одной из осей с вертикалью и при ее повороте на $\sim 22,5^\circ$ (в этом случае $\xi_1 \approx \xi_2$).

На рис. 1 приведены данные измерений степени линейной и циркулярной поляризации в исследованном диапазоне энергий, на рис. 2 — соответствующие значения полной степени поляризации. Теоретические кривые рассчитаны по формулам (6). Для двух значений энергии электронов измерена еще одна важная поляризационная характеристика: угол ϵ эллиптичности СИ (рис. 3), определяемый здесь как $\epsilon = (1/2) \arcsin(\xi_3/P)$. Не вызывает сомнений тот факт, что во всех случаях результаты эксперимента значительно лучше согласуются с расчетами, учитывающими влияние бетатронных колебаний (по сравнению с приближением круговой орбиты); некоторые расхождения могут быть объяснены неконтролируемыми возмущениями магнитного поля. Общий анализ теоретических и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о том, что основным деполаризующим фактором для СИ являются бетатронные колебания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М., Наука, 1983.
2. Королев Ф. А., Куликов О. Ф., Яров А. С. ЖЭТФ, 43, 1653 (1962).
3. Королев Ф. А., Куликов О. Ф., Яров А. С. Опт. и спектр., 24, 316 (1968).
4. Жуковский В. Ч., Шишанин О. Е. Опт. и спектр., 31, 857 (1971).
5. Гришанин Б. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 37 (1984).

Поступила в редакцию 18 сентября 1987 г.